

时瑞,柯范生,吴曼铃,等.海藻乳酸菌发酵的研究进展[J].食品工业科技,2021,42(16):381-387. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080144

SHI Rui, KE Fansheng, WU Manling, et al. Research Progress of Seaweed Fermentation with Lactic Acid Bacteria[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 381-387. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080144

· 专题综述 ·

海藻乳酸菌发酵的研究进展

时 瑞,柯范生,吴曼铃,胡锦涛,曾斌芬,梁 鹏,陈丽娇,程文健*
(福建农林大学食品科学学院,福建福州 350002)

摘 要:海藻是一类重要的海洋资源,富含大量营养元素如蛋白质、碳水化合物、维生素和矿物质,以及多糖、酚类等生物活性物质。由于海藻营养价值极高,利用乳酸菌发酵海藻促进生物活性化合物的产生和释放,具有良好的健康效益。因此,本文根据国内外近年来利用乳酸菌发酵海藻的相关研究报道,对乳酸菌发酵类型、乳酸菌发酵海藻的可行性和乳酸菌主要种类、以及乳酸菌在海藻发酵中的效果和作用进行阐述,同时综述了乳酸菌发酵海藻在食品行业中的开发应用现状,并对今后发展趋势和前景进行展望,为藻类乳酸菌发酵制品的开发提供一定参考。

关键词:海藻,乳酸菌,发酵

中图分类号:TS254.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2021)16-0381-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080144

Research Progress of Seaweed Fermentation with Lactic Acid Bacteria

SHI Rui, KE Fansheng, WU Manling, HU Jinpeng, ZENG Binfen, LIANG Peng,
CHEN Lijiao, CHENG Wenjian*

(College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Edible seaweed is one of the most important marine food stuffs. Many nutrient elements such as proteins, carbohydrates, vitamins, minerals, and bioactive substances such as polysaccharides, phenols, etc. have been found in the tissue of seaweed. More and more researchers have revealed that seaweed is fermentable to lactic acid bacteria (LAB) due to its nutritional facts. It has been shown that LAB fermentation can improve the quality or safety of seaweed products, and promote the release or production of some bioactive compounds. Thus, seaweed fermentation by using LAB can provide a wide array of fermented seaweed-based foods with excellent health benefits. In this paper, according to the relevant research reports of seaweed fermentation by lactic acid bacteria at home and abroad in recent years, the types of fermentation by lactic acid bacteria, the feasibility of seaweed fermentation by lactic acid bacteria and the main types of lactic acid bacteria, as well as the effect and role of lactic acid bacteria in seaweed fermentation are described, and the development and application status of seaweed fermentation by lactic acid bacteria in food industry is summarized. Finally, the future trends and prospects in this research field are analyzed to provide a certain reference for the further development of more healthy LAB fermented seaweed foods.

Key words: seaweed; lactic acid bacteria; fermentation

乳酸发酵是指微生物利用可发酵碳水化合物,经无氧酵解而生成乳酸的发酵过程。能进行乳酸发酵的微生物包括真核微生物中的米根霉等霉菌和一些细菌^[1]。而能利用可发酵碳水化合物进行乳酸发

酵的细菌则被统称为乳酸菌。乳酸菌是人类最早利用于食品保藏与加工的微生物之一。目前自然界中发现的乳酸菌从细菌分类学上可以划分为 6 科,43 个属,包括 373 个种以及亚种^[2]。其中,在食品加

收稿日期:2020-08-17

基金项目:福州市“十三五”海洋经济创新发展示范城市项目(FZJH17);福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2017017);福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2018066)。

作者简介:时瑞(1994-),女,硕士研究生,研究方向:食品加工保藏理论与应用,E-mail: shirui923@163.com。

* 通信作者:程文健(1974-),男,博士,副教授,研究方向:水产品加工,E-mail: chengwj@fafu.edu.cn。

工领域应用较多的乳酸菌分属于乳杆菌属、乳球菌属、链球菌属、双歧杆菌属、肠球菌属、片球菌属和明串珠菌属等七个属种^[3]。乳酸菌以碳水化合物为主要底物,辅以必要的氮源、无机盐和生长因子进行发酵,其主要代谢产物为以乳酸为主要成分的有机酸,此外,发酵过程中还会产生细菌素、乙醛等芳香物质、胞外多糖、 γ -氨基丁酸等产物。这些产物除了可以赋予食品良好的风味,提高食品的保藏性外,有些还具有生物活性^[4]。因此,乳酸菌在各类食品加工中的应用受到广泛的关注。

我国有着丰富的海藻资源,据相关统计数据,近几年,我国以海带、紫菜、江篱、裙带菜等为代表的大型食用海藻产量已经超过 200 万吨。现代海藻化学领域的研究表明,海藻中含有十分丰富的具有生理活性的海藻多糖等碳水化合物,较为丰富的蛋白质、维生素、矿物质等营养物质,以及甘露醇、牛磺酸等小分子生物活性物质,是一种具有良好营养价值和生理活性的食品资源,具有良好的应用潜力^[5]。但是,与日本等海藻食品资源利用大国相比,目前我国海藻食品加工业整体处于加工品种单一、加工技术水平低、藻类利用率低的水平。海藻食品的开发仅限于脱水干制、腌渍等有限的加工方式。因此,如何充分利用海藻的营养与生理功能成分,开发高价值的海藻健康食品,成为我国海藻食品产业发展需要迫切解决的重要问题。

近年来,利用乳酸菌的发酵特性,对海藻进行处理,用来改善海藻食品品质和安全性、提高海藻食品的营养价值和生理活性,以拓展海藻资源在海藻精深加工食品中的应用。这已成为海藻开发利用的一个重要研究和方向。本文结合近年来国内外乳酸菌发酵技术在海藻中的应用研究报道,介绍了乳酸菌发酵类型,系统地阐述了乳酸菌发酵海藻的可行性及可用于海藻发酵的主要乳酸菌种类,并在总结乳酸菌发酵海藻的效果与作用以及相关产品的研究开发现状基础上提出展望,以期开发健康的海藻乳酸菌发酵食品提供参考。

1 乳酸菌发酵类型

乳酸菌的发酵类型可以分为三类,包括专性同型发酵、专性异型发酵和兼性异型发酵,主要的代谢差异取决于糖的发酵途径。专性同型发酵指利用葡萄糖为发酵底物通过糖酵解途径(embden-meyerhof pathway, EMP)生产乳酸且不产生气体的过程;专性异型发酵则可以利用葡萄糖为底物通过磷酸戊糖途径(hexose monophosphate pathway, HMP)进行分解代谢,葡萄糖代谢产物为乳酸、乙醇和二氧化碳,核糖代谢产物为乳酸、乙酸,果糖的代谢产物为乳酸、乙酸、二氧化碳和甘露糖;兼性异型发酵既可以利用己糖通过 EMP 途径产生乳酸,也可以利用戊糖通过 HMP 途径产生乙酸和乳酸^[6]。

海藻中含有丰富的碳水化合物,包括各种单糖

如葡萄糖、半乳糖、木糖等,双糖如纤维二糖以及低聚糖如低聚木糖、低聚半乳糖等。此外,海藻中还含有大量的海藻多糖如褐藻胶、卡拉胶、琼脂胶、岩藻多糖、海藻淀粉、纤维素等^[7-8]。不同种类和来源的海藻中这些碳水化合物的组成和比例具有差异性,海藻中含有的单糖可直接作为乳酸菌发酵的底物,一些低聚糖则可以通过某些乳酸菌自身产生的酶或酶系降解为单糖,从而可作为乳酸菌发酵的底物而被利用,海藻中含有的大量的海藻多糖则可以通过水解转化为可发酵的单糖或寡糖为乳酸菌所利用。海藻中糖的种类丰富,不同发酵类型的乳酸菌通过不同的代谢途径利用海藻中的这些可发酵糖发酵所产生的产物种类、含量及作用效果是有差异的^[9]。在利用乳酸菌对海藻进行发酵过程中,可以选用合适发酵类型的菌种,有针对性的对海藻中的可发酵底物进行代谢,已达到最优的目标发酵效果。

2 乳酸菌发酵海藻的可行性及乳酸菌主要种类

2.1 乳酸菌发酵海藻的可行性

藻类生物质含有丰富的碳水化合物、蛋白质、脂质、维生素和矿物质,经过适当的处理,可为乳酸菌的生长提供良好的营养条件,与植物生物质相比,木质素的缺少成为一个额外的优势。半乳糖和葡萄糖是红藻细胞壁中主要的中性糖,紫菜中还包括甘露糖、半乳糖和木糖,这些单糖可以直接被乳酸菌发酵利用。但藻体中单糖的含量相对较少,如葡萄糖、半乳糖、木糖、鼠李糖等单糖的总含量只占半叶马尾藻藻体干重的 1% 左右。而藻类多糖含量通常占藻体干重的 50% 左右,藻类多糖可以分为淀粉、褐藻胶等储存性多糖和琼脂、卡拉胶、岩藻多糖、藻酸盐等结构性多糖。淀粉是由 α -1,4 或者 α -1,6 糖苷键连接葡萄糖残基形成;褐藻胶和藻酸盐均由 1,4 糖苷键连接聚古罗糖醛酸和聚甘露糖醛酸形成;琼脂和卡拉胶是由半乳糖和脱水半乳糖经过 α -1,3 糖苷键、 β -1,4 糖苷键交替连接而成;而岩藻多糖结构因藻体不同形成差异。由于大部分乳酸菌不能够产生藻类多糖相应的降解酶,因此不能够直接利用这些多糖进行发酵,所以这些海藻多糖一般需在经过糖化处理后将糖苷键断裂后转化为葡萄糖、甘露糖、木糖、半乳糖等可被乳酸菌直接利用的单糖^[10]。

由于海藻类原料本身具备较厚的细胞壁,有效成分难以溶出,发酵前通常会进行预处理,可以利用改变温度、pH 和添加酶等方式使海藻中结构和储存碳水化合物溶出并糖化,有利于乳酸菌分解利用^[11],从而充分利用海藻碳源,更有效的发挥乳酸菌发酵产酸、脱腥以及促进生物活性物质生成等作用,提高发酵效率。Talukder 等^[12]利用 5% 稀硫酸在 121 °C 下预处理 1 h 对微藻进行酸水解,再利用正己烷除去油脂,使糖得率(葡萄糖和木糖)提高到 64.3%,将脱脂水解液中和之后接种戊糖片球菌,在厌氧、发酵温

度为 30 ℃ 以及糖浓度为 3~25 g/L 的条件下进行发酵产酸,最终乳酸产率可以达到 90% 左右,但酸处理过程中产生的抑制剂糠醛和羟甲基糠醛会导致乳酸产率的降低。而酶法处理条件相对温和,副产物少,张丽姣等^[13] 利用纤维素酶水解海带使褐藻多糖等有效成分溶出,并将纤维素降解成单糖,再利用戊糖片球菌对海带酶解物进行发酵,从而使菌种有效地利用藻体中的碳源促进发酵。

2.2 目前研究的主要乳酸菌种类

表 1 部分列举了目前国内外关于海藻发酵研究中常用的一些乳酸菌,针对海藻来源的单糖成分,乳酸菌可直接进行发酵利用,但由于代谢途径、关键酶以及发酵环境的不同,不同种乳酸菌对葡萄糖、木糖、阿拉伯糖、半乳糖等单糖的利用具有特异性。除单糖以外,其他低聚糖、多糖一般不能被乳酸菌直接利用。海藻来源低聚糖需乳酸菌分泌相应的酶分解后再进行代谢利用,如植物乳杆菌、短乳杆菌、戊糖片球菌等能够产 β -葡萄糖苷酶分解纤维二糖,从而进一步进行乳酸发酵^[27];双歧杆菌代谢低聚木糖是通过 ABC 转运蛋白将低聚木糖转移至细胞内,再被胞内木聚糖苷酶水解成 D-木糖进行代谢;乳酸菌对低聚半乳糖的代谢包括先由胞外酶水解再转运进入胞内进行糖酵解和先转运再由胞内酶水解两种方式,但最终都通过酶的作用转化成葡萄糖和半乳糖进行糖酵解^[28]。乳酸菌对低聚糖的代谢差异,主要是由于基因编码的转运系统、水解酶系及相应调控蛋白导致。海藻多糖则需要经过酸、热、酶处理或其他微生物降解,分解成单糖和低聚糖再进行上述利用。相比于明串珠菌属、片球菌属和双歧杆菌属,乳杆菌属在藻类发酵中使用更为广泛,主要由于乳杆菌一般对糖的分解能力强且产酸量高^[29]。明串珠属乳酸菌发酵对象局限于单糖和双糖,包括甘露糖、木糖、海藻糖和纤维二糖等,但不能利用半乳糖、阿拉伯糖和岩藻糖等发酵产酸^[30-31]。片球菌属乳酸菌能够利用己

糖、戊糖、低聚糖和聚合物,如低聚木糖和海藻淀粉^[20]。双歧杆菌属乳酸菌能够将一些不易消化的低聚糖(non-digestible oligosaccharides, NDOs),如低聚木糖、卡拉胶低聚糖、琼脂低聚糖等代谢成乳酸、乙酸等有机酸和短链脂肪酸。同时,双歧杆菌属的糖发酵具有偏好性,生物型长双歧杆菌,如青春双歧杆菌和长双歧杆菌可以发酵阿拉伯低聚木糖、阿拉伯半乳糖,生物型短双歧杆菌则相反,主要是由于其基因组序列中缺乏糖苷水解酶等修饰酶^[32-34]。

由于环境的多样性,海藻植物基发酵本身固有的物化参数,如抑制因子,导致细菌生长条件苛刻,需要乳酸菌对特定营养环境具有一定的适应性^[35-36],且不同种类不同环境来源的海藻糖成分和含量具有差异,如红藻中主要为结构性多糖琼脂和卡拉胶,褐藻主要为岩藻多糖、褐藻多糖和藻酸盐,绿藻为石莼多糖和木聚糖^[37]。同时由于关键酶和糖代谢途径差异,不同乳酸菌对藻类糖成分的分解代谢存在特异性关系^[38]。所以,针对不同品类海藻,需选择合适的乳酸菌进行发酵。

3 乳酸菌发酵海藻的效果与作用

海藻分为褐藻、红藻等多个门,其中褐藻和红藻门在乳酸菌发酵藻类的研究应用中最为常见,藻类能被利用的有效物质及乳酸菌的发酵机制都具有差异性,发酵过程中所产生的作用也不同(见表 2)。近几年利用乳酸菌发酵海藻发挥其特定效应得到广泛关注。

3.1 脱腥

海藻有丰富的营养成分同时具有独特的生理活性,是一类资源丰富的健康食品,但是藻类产品本身具备特有的腥味,很大程度影响消费者的感官体验,限制了海藻类产品的加工应用。海藻中特有的腥味主要是由于羧酸类、烃类、芳香类等多种有机成分构成,目前对藻类脱腥的方法主要有物理脱腥法、化学脱腥法以及微生物发酵脱腥法^[43]。有研究利用预期

表 1 可用于海藻发酵的乳酸菌
Table 1 LAB used for seaweed fermentation

属名	菌种	可发酵海藻碳源		参考文献
		可直接酵解	不可直接酵解	
乳杆菌属 (<i>Lactobacillus</i>)	植物乳杆菌(<i>L.plantarum</i>)			
	保加利亚乳杆菌 (<i>L.bulgaricus</i>)	葡萄糖、半乳糖、木糖、 阿拉伯糖、鼠李糖	纤维二糖、低聚木糖、琼脂低聚糖、纤维 素、半纤维素、岩藻多糖、海藻淀粉	[14-18]
	短乳杆菌(<i>L.brevis</i>)			
	鼠李糖乳杆菌(<i>L.rhamnosus</i>)			
		德氏乳杆菌(<i>L.delbrueckii</i>)		
明串珠属 (<i>Leuconostoc</i>)	肠膜明串珠菌 (<i>Leuc.mesenteroides</i>)	葡萄糖、木糖、甘露糖、核糖	海藻糖、纤维二糖	[4,19]
片球菌属 (<i>Pediococcus</i>)	乳酸片球菌(<i>P.acidilactici</i>)	葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖	纤维二糖、低聚木糖、海藻淀粉	[13, 20-22]
	戊糖片球菌(<i>P.pentosaceus</i>)			
双歧杆菌属 (<i>Bifidobacterium</i>)	青春双歧杆菌(<i>B.adolescence</i>)		纤维二糖、低聚半乳糖、低聚木糖、	
	长双歧杆菌(<i>B.longum</i>)	葡萄糖、木糖、半乳糖	卡拉胶低聚糖、琼脂低聚糖、	[23-26]
	婴儿双歧杆菌(<i>B.infantile</i>)		甘露低聚糖	

表 2 几种海藻发酵中的乳酸菌及其作用

Table 2 Functions of several LAB in seaweed fermentation

门类	藻种	预处理方式	菌种	作用	参考文献
褐藻	海带	纤维素酶水解	戊糖片球菌	提高海带酶解液抗氧化抗菌能力	[13]
	裙带菜		明串珠菌M2T	有益于裙带菜泡菜特定风味的形成	[19]
	羊栖菜	破碎离心去除海藻残渣	乳杆菌SH-1、明串珠菌SH-1	提高自由基清除率、总酚和总黄酮含量	[4]
	马尾藻	烘干后研磨成细粉	植物乳杆菌	增强抗凝血和抗氧化活性	[39]
红藻	紫菜	90 ℃加热浸提	保加利亚乳杆菌	改善紫菜发酵饮料风味	[40]
	龙须菜	105 ℃高压加热后离心取水提液	植物乳杆菌	提高氧自由基清除能力	[41]
绿藻	浒苔	0.5 mol/L硫酸水解	植物乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、短乳杆菌、干酪乳杆菌	海藻为生物质原料发酵生产乳酸	[14]
蓝藻	螺旋藻	冷冻干燥	植物乳杆菌	显著提高抗氧化活性和总酚含量	[42]

气味强度(EOI)和预期气味归因(EOA)对海藻提取物中释放的 56 种挥发性物质进行计算分析,发现异戊酸(41.2%)、异硫氰酸烯丙酯(22.6%)、辛醛(11.1%)、乙醛(10.6%)共占总腥味成分的 85.5%,利用微生物发酵的方法可以有效去除藻类腥臭味^[44]。微生物发酵脱腥法中,酵母菌最常用于藻类的脱腥加工,近年来,利用乳酸菌对海藻进行发酵脱腥也有一定范围的应用。植物乳杆菌发酵过程降低海藻中的钠,咸味的减少使口感更佳柔和,腥味去除的同时,有机酸和乙醛等芳香物质的形成带来特殊浓郁的风味,从而改善藻类发酵产品的品质,研究者利用植物乳杆菌和酵母菌对海带酶解液进行发酵,发现菌种的联合发酵更能有效地去除海带的腥味^[45-46]。

3.2 产酸

乳酸菌利用海藻发酵产酸,不仅可以为发酵产品提供特殊的口感风味,同时还可以降低 pH 达到抑菌防腐的作用^[47]。关于乳酸发酵的研究,其原料来源大多是陆地植物,糖成分简单,如葡萄糖、半乳糖;海洋来源的藻类,糖成分丰富,可发酵糖类包括葡萄糖、半乳糖、甘露糖,以及鼠李糖、甘露醇等陆地植物中相对少见的成分。海藻糖成分和乳酸菌代谢途径的不同会导致乳酸产量产生差异性,但利用现阶段技术并结合海藻糖组成以及每种糖的产酸水平进行比较分析发现,海藻的乳酸产量与木质来源纤维素相当,因此利用海藻作为生产乳酸的原料具备更好的应用前景^[48]。同时,褐藻乳酸菌发酵后可以产生一些有益的短链脂肪酸,如乙酸和丁酸^[49]。在海藻发酵过程中,乙酸是除乳酸外的重要产物,它是我国使用最早的一种酸味剂,在食品行业中应用广泛,有强烈的酸味和香味,对藻类发酵食品风味的形成起着至关重要的作用^[50]。

3.3 促进海藻生物活性物质的释放和生成

海藻营养成分丰富,具有抗氧化、抗糖基化、免疫调节等生理功能,而乳酸菌发酵是一种经济有效的提取海藻中生物活性分子的方式,从而提高藻类产品生理活性。通常,利用天然海藻原料直接发酵生产生物活性化合物的研究相对较少,需结合发酵前的预处理来提高发酵海藻产品质量,如采用物理破碎^[4]、酶

法降解^[13]、热降解^[40]等方式。海藻富含酚类化合物,显示很好的抗氧化活性,乳酸菌用于海藻发酵,可以诱导植物细胞壁的破坏,促进各种酚类、海藻多糖等活性物的释放^[51]。Vergeer 等^[52]利用热降解的形式处理海藻匀浆液,并进行乳酸菌发酵,发酵可以代谢藻类中释放的咖啡酸等酚类物质,将其转化成具有更高生物活性、更易吸收的简单形式。也有研究证明,经过琼脂酶降解得到的海藻低聚糖,利用乳酸菌发酵后的产物具有清除羟基自由基的作用,从而发挥显著的抗氧化活性^[53]。Kuda 等^[54]和 Eda 等^[55]研究发现,利用乳酸菌发酵经过干燥研磨过筛处理后制备的海藻水提液,可以提高藻类抗糖基化活性,而糖基化高级产物被认为会导致糖尿病以及人体的衰老,植物乳酸菌对不同食用藻类进行发酵的对比模型显示,发酵后的海藻抗糖基化活性明显增强,因此,利用乳酸菌发酵制备的藻类产品在预防糖尿病和衰老中具备应用潜力。乳酸菌是 γ -氨基丁酸(Gamma-aminobutyric acid, GABA)重要的生产者,研究人员利用植物乳杆菌作为发酵剂发酵饮用水浸泡清洗后的红藻,提高红藻发酵饮料中 GABA 含量,而 GABA 是一种重要的氨基酸,它几乎存在于人体的每个部位,具有降血压、提高免疫力等多种生物活性,对健康有很大的影响,因此有望开发出一种高 GABA 含量的功能性发酵红藻饮料^[56-57]。除此之外,海藻乳酸菌发酵产物还具备抗凝血等其他活性,这些研究发现为海藻功能性产品的开发奠定了基础^[58]。

3.4 提高安全性

亚硝酸盐是一种食品添加剂,但是过量食用亚硝酸盐会导致中毒,而腌渍过程中硝酸盐会还原成亚硝酸盐,甚至会产生亚硝胺等致癌物质。近年来,有研究发现,接种乳酸菌发酵蔬菜、肉制品、海藻泡菜等,不仅能够缩短发酵周期,还能够降解胆固醇并显著降低亚硝酸盐的含量,从而有效提高发酵产品的品质^[59-60]。张庆芳等^[61]对乳酸菌降解亚硝酸的机理进行研究,发现乳酸菌对亚硝酸盐的降解分为酶解和酸解,发酵前期,经过亚硝酸盐的诱导乳酸菌产生亚硝酸盐还原酶,以酶降解为主,发酵后期由于乳酸的大量生成,以酸降解为主。藻类食品发酵过程中,乳酸

菌的作用使亚硝酸盐含量处于较低水平,极大地提高发酵海藻泡菜的品质^[62]。

不同来源的藻类重金属的含量也不相同,在藻类食品的制备过程中,有毒重金属含量的检测和控制尤为重要。乳酸菌通过细胞表面吸附作用将未经代谢的游离重金属通过正负电荷结合到细胞表面,乳酸形成的酸性环境对重金属络合具有增溶作用,在体外能够有效吸附藻类中的有毒重金属,阻断重金属体内蓄积及毒性作用的发挥,从而提高发酵产品的食用安全性^[63-64]。

4 乳酸菌发酵海藻食品的研究开发现状

4.1 海藻饮料

发酵型海藻饮料原料的选用以海带为主,其次为螺旋藻和紫菜,发酵过程中需要添加不同的辅助材料以改善产品的口感^[23,65]。海藻发酵饮料分为乳制品型和非乳制品型,乳制品型海藻发酵饮料的原料除了海藻,通常还包括牛奶、乳粉、酸奶等。海藻和辅助原料的匀浆水提液在经过乳酸菌发酵之后,改善了产品质构,其稠度、粘度指数和凝聚性至少提高了10%,再利用糖酸等配比材料对饮料的口感、色泽、质地进行适度调配,从而开发出具备海藻和乳制品风味且营养全面的功能性海藻发酵饮料;非乳制品型发酵饮料原料的选择是以海藻为主,海藻水提物经过乳酸菌发酵之后,调配生产出的海藻饮料,调配过程也会添加其他果汁,如苹果汁、枣汁、番茄汁,从而制备出不同口味的复合汁饮料^[66-67]。发酵海藻饮料不仅能够满足人们对不同口味的需求,同时因其功能性可以满足不同人群的特定需求,从而开拓海藻应用市场。

4.2 海藻泡菜

海藻泡菜利用乳酸菌的发酵作用改善藻类本身的腥味,同时产生特定的风味,此外乳酸菌可以生产多种有机酸可以作为天然的防腐剂,海藻泡菜的开发可以增加泡菜产品类型,对消费者提供健康益处,推动海藻产品的深加工。Sarah 等^[68]接种植物乳杆菌和肠膜明串珠菌对海藻进行发酵,采用非保温工艺控制低成本生产方案,利用乳酸菌的发酵作用开发出一种具有安全性、高质量,且能够延长冷藏货架期的增值型海藻产品,以此创造出高附加值的海藻产品,为市场多元化提供了重要理论基础。成群等^[69]利用乳酸菌对条斑紫菜进行发酵,并研究发酵过程中不同理化因子的变化规律,研究结果显示,利用乳酸发酵法直接发酵紫菜的方案是可行的,从而为紫菜乳酸菌发酵工艺及其产品的相关开发提供依据。

4.3 其他海藻发酵食品

海藻营养成分丰富热量低,具有多种生物活性,海藻糖因其独特的增稠稳定性可以作为胶凝剂、稳定剂用于一些休闲食品的开发应用中,乳酸菌对海藻进行发酵可以生产出具有海藻和益生菌双重保健功能的休闲食品。郑宝林等^[70]利用双歧杆菌发酵海藻

汁并采用正交试验方式确定稳定剂、添加剂配方,生产出高保健作用的新型冰淇淋。付荣霞等^[71]以海带和脱脂乳粉为原料制备浆液,利用保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌混合菌种进行乳酸菌发酵,再添加黑芝麻、蔗糖进行调配,开发出发酵型的海带黑芝麻酸奶冻,不仅填补酸奶冻市场空白,同时兼具海带、黑芝麻、乳酸菌多种营养保健功效,为后期藻类食品的深加工提供了一定的参考价值。颜玉虾等^[72]以海带浆为底物,利用乳酸菌进行发酵,制备得到一种富含乳酸菌活性的海带乳酸菌咀嚼片,是一类营养丰富、口感美味的休闲食品,更是拓宽了海藻类产品精深加工的途径。

5 展望

我国藻类资源丰富,但是藻类资源的精深加工程度并不高,传统藻类食品的加工以干制、盐渍为主,而藻类乳酸菌发酵食品的研究开发历史还很短,但是海藻乳酸菌发酵后具有良好风味,能促进海藻生物活性物质的释放和生成的作用,提高海藻食品的安全性,同时可以生产有机酸。因此,藻类乳酸菌发酵食品越来越受到人们的关注,具有巨大的应用潜力。随着生物技术的发展,通过深入研究乳酸菌在海藻发酵中的代谢机制和菌种筛选,以进一步提高海藻中碳水化合物化合物的利用率、增加乳酸等有益物质的产量和提高海藻食品的功能活性。这个领域的深入研究,有望成为海藻资源充分利用的重要研究方向,具有良好的发展前景。

参考文献

- [1] Zhang Z Y, Jin B, Kelly J M. Production of lactic acid from renewable materials by *Rhizopus fungi*[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, 35(3): 251-263.
- [2] Papadimitriou K, Alegria Á, Bron P A, et al. Stress physiology of lactic acid bacteria[J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2016, 80(3): 837-890.
- [3] Stiles M E, Holzapfel W H. Lactic acid bacteria of foods and their current taxonomy[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1997, 36(1): 1-29.
- [4] Lee S, Lee D, Park S, et al. Comparison of biological activities in sargassum siliquanstrum fermented by isolated lactic acid bacteria[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2015, 20(2): 341-348.
- [5] Balina K, Romagnoli F, Blumberg D. Seaweed biorefinery concept for sustainable use of marine resources[J]. *Energy Procedia*, 2017, 128: 504-511.
- [6] 何晓赞. 乳酸菌发酵类型对老酵馒头风味特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [7] 美合热阿依·木台力甫, 乌斯满·依米提. 乳酸菌与纤维素分解菌混合菌剂对玉米青贮饲料发酵品质的影响[J]. *饲料工业*, 2016, 37(23): 51-54.
- [8] König Helmut, Jürgen F. Biology of microorganisms on grapes, in must and in wine[M]. Mainz: Springer, Berlin, Heidelberg, 2009: 3-29.

- [9] 韦金娜, 朱宝生, 龙琳. 乳酸菌发酵植物基饮料的研究进展[J]. 饮料工业, 2019, 22(5): 68-72.
- [10] Mišurcová L, Akrovníková S, Samek D, et al. Health benefits of algal polysaccharides in human nutrition[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2012, 66: 75-145.
- [11] Gupta S, Abu-Ghannam N, Rajauria G. Effect of heating and probiotic fermentation on the phytochemical content and antioxidant potential of edible Irish brown seaweeds[J]. *Botanica Marina*, 2012, 55(5): 527-537.
- [12] Talukder M M R, Das P, Wu J C. Microalgae (*Nannochloropsis salina*) biomass to lactic acid and lipid[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, 68: 109-113.
- [13] 张丽姣, 曾艳, 张换, 等. 海带酶解液的戊糖片球菌发酵及其产物的抗氧化性、抑菌性[J]. *食品科学*, 2014, 35(21): 164-169.
- [14] Hwang H J, Kim S M, Chang J H, et al. Lactic acid production from seaweed hydrolysate of *Enteromorpha prolifera* (chlorophyta)[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2012, 24(4): 935-940.
- [15] Ratanaburee A, Kantachote D, Charennjiratrakul W, et al. Enhancement of γ -aminobutyric acid in a fermented red seaweed beverage by starter culture *Lactobacillus plantarum* DW12[J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2011, 14(3): 1-1.
- [16] 陈智慧, 高锦洪, 孙纪录. 双歧杆菌对糖类的利用和代谢[J]. *中国酿造*, 2013, 32(1): 13-16.
- [17] Rhee S J, Lee J, Lee C. Importance of lactic acid bacteria in Asian fermented foods[J]. *Microbial Cell Factories*, 2011, 10(1): 1-13.
- [18] Abdel R, Mohamed A, Yukihiro T, et al. Lactic acid production from lignocellulose-derived sugars using lactic acid bacteria: overview and limits[J]. *Journal of Biotechnology*, 2011, 156(4): 286-301.
- [19] Lee S H, Park M S, Jung J Y, et al. *Leuconostoc mityukimchii* sp. nov., isolated from brown algae (*Undaria pinnatifida*) kimchi[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, 62(5): 1098-1103.
- [20] 张健. 乳酸片球菌细菌素的发酵与纯化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [21] Boguta A M, Bringel F, Martinussen J, et al. Screening of lactic acid bacteria for their potential as microbial cell factories for bioconversion of lignocellulosic feedstocks[J]. *Microb Cell Fact*, 2014, 13(1): 97-97.
- [22] Zhao L, Wu Y Q, Nie W, et al. Transcriptomic analysis of xylan oligosaccharide utilization systems in *Pediococcus acidilactici* strain BCC-1[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(18): 4725-4733.
- [23] Olmo, Ana D, Antonia P, et al. Probiotic dynamics during the fermentation of milk supplemented with seaweed extracts: The effect of milk constituents[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 107: 249-255.
- [24] Li M, Shang Q, Li G, et al. Degradation of marine algae-derived carbohydrates by bacteroidetes isolated from human gut microbiota[J]. *Mar Drugs*, 2017, 15(4): 92.
- [25] Li M, Li G, Zhu L, et al. Isolation and characterization of an agaro-oligosaccharide (AO)-hydrolyzing bacterium from the gut microflora of Chinese individuals[J]. *PloS One*, 2014, 9(3): 1-9.
- [26] 张晓萍, 勇强, 余世袁. 青春双歧杆菌体外代谢低聚木糖的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 5-8.
- [27] 李志华. 产 β -葡萄糖苷酶乳酸菌菌株的特性研究[D]. 延吉: 延边大学, 2014.
- [28] 陈臣, 卢艳青, 于海燕, 等. 乳酸菌代谢低聚糖机理的研究进展[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(6): 274-283.
- [29] Sauer M, Russmayer H, Grabherr R, et al. The efficient clade: Lactic acid bacteria for industrial chemical production[J]. *Trends in Biotechnology*, 2017, 35(8): 756-769.
- [30] Hemme D, Foucaud-Scheunemann C. *Leuconostoc*, characteristics, use in dairy technology and prospects in functional foods[J]. *International Dairy Journal*, 2004, 14(6): 467-494.
- [31] 崔亮, 岳媛媛, 乌日娜. 明串珠菌应用研究进展[J]. *乳业科学与技术*, 2018, 41(5): 28-34.
- [32] Broek, Van D, Lambertus A M, et al. Bifidobacterium glycoside hydrolases and (potential) prebiotics[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2008, 9(4): 401-407.
- [33] 吕锡斌, 何腊平, 张汝娇, 等. 双歧杆菌生理功能研究进展[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(16): 353-358.
- [34] 雷钊, 尹达菲, 袁建敏. 阿拉伯木聚糖和阿拉伯低聚木糖的益生功能研究进展[J]. *动物营养学报*, 2017, 29(2): 365-373.
- [35] Filannino P, Raffaella D C, Marco G. Metabolic and functional paths of lactic acid bacteria in plant foods: Get out of the labyrinth[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2018, 49: 64-72.
- [36] Teusink B, Molenaar D. Systems biology of lactic acid bacteria: For food and thought[J]. *Current Opinion in Systems Biology*, 2017, 6: 7-13.
- [37] Cherry P, Yadav S, Strain C R, et al. Prebiotics from seaweeds: An ocean of opportunity[J]. *Marine Drugs*, 2019, 17(6): 327.
- [38] Goh Y J, Klaenhammer T R. Genetic mechanisms of prebiotic oligosaccharide metabolism in probiotic microbes[J]. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2015, 6: 137-156.
- [39] Shobharani P, Halami P M, Sachindra N M. Potential of marine lactic acid bacteria to ferment *Sargassum* sp. for enhanced anticoagulant and antioxidant properties[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2013, 114(1): 96-107.
- [40] 张静, 郝记明. 紫菜发酵饮料的开发研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(9): 2726-2727.
- [41] Takei M, Kuda T, Eda M, et al. Antioxidant and fermentation properties of aqueous solutions of dried algal products from the Boso Peninsula, Japan[J]. *Food Bioscience*, 2017, 19: 85-91.
- [42] Niccolai A, Shannon E, Abughannam N, et al. Lactic acid fermentation of *Arthrospira platensis* (spirulina) biomass for probiotic-based products[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2019, 31(2): 1077-1083.
- [43] 段吴勇. 海带腥味成分鉴定、脱除方法及应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [44] Seo Y, Bae H, Eom S, et al. Removal of off-flavors from sea tangle (*Laminaria japonica*) extract by fermentation with *Asper-*

- gillus oryzae*[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121: 475–479.
- [45] 姚艳艳, 常丽荣, 王晓辉, 等. 海带酶解液的脱色及发酵脱腥工艺研究[J]. *中国酿造*, 2017, 36(10): 149–153.
- [46] Bruhn, Annette. Fermentation of sugar kelp (*Saccharina latissima*)—effects on sensory properties, and content of minerals and metals[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2019, 31(5): 3175–3187.
- [47] Juturu V, Wu J C. Microbial production of lactic acid: The latest development[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2015, 36(6): 967–977.
- [48] Hwang H J, Lee S Y, Kim S M, et al. Fermentation of seaweed sugars by *Lactobacillus* species and the potential of seaweed as a biomass feedstock[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2011, 16(6): 1231–1239.
- [49] Charoensiddhi S, Michael A C, Michelle S, et al. Polysaccharide and phlorotannin-enriched extracts of the brown seaweed *Ecklonia radiata* influence human gut microbiota and fermentation *in vitro*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 29(5): 2407–2416.
- [50] Ho C W, Lazim A M, Fazry S, et al. Varieties, production, composition and health benefits of vinegars: A review[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1621–1630.
- [51] Chye, Fook Yee. Fermentation-derived bioactive components from seaweeds: Functional properties and potential applications[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2018, 27(2): 144–164.
- [52] Vergeer, Luc H T, Akin D. Phenolic acids in healthy and infected leaves of *Zostera marina* and their growth-limiting properties towards *Labyrinthula zosterae*[J]. *Aquatic Botany*, 1997, 58(1): 65–72.
- [53] Wu S C, Wang F J, Pan C L. The comparison of antioxidative properties of seaweed oligosaccharides fermented by two lactic acid bacteria[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2010, 18(4): 537–545.
- [54] Kuda T, Eda M, Kataoka M, et al. Anti-glycation properties of the aqueous extract solutions of dried algae products and effect of lactic acid fermentation on the properties[J]. *Food Chemistry*, 2016, 192: 1109–1115.
- [55] Eda M, Kuda T, Kataoka M, et al. Anti-glycation properties of the aqueous extract solutions of dried algae products harvested and made in the Miura Peninsula, Japan, and effect of lactic acid fermentation on the properties[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, 28(6): 3617–3624.
- [56] Mei H, Liao W Y, Wu S M, et al. Use of *Streptococcus thermophilus* for the *in situ* production of γ -aminobutyric acid-enriched fermented milk[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(1): 98–105.
- [57] Quílez J, Diana M. Gamma-aminobutyric acid-enriched fermented foods[J]. *Fermented Foods in Health and Disease Prevention*, 2017: 85–103.
- [58] Shobharani, P, Nanishankar, V H, Halami, P M, et al. Antioxidant and anticoagulant activity of polyphenol and polysaccharides from fermented *Sargassum* sp[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 65: 542–548.
- [59] Chen X, Li J, Zhou T, et al. Two efficient nitrite-reducing *Lactobacillus* strains isolated from traditional fermented pork (Nanx Wudl) as competitive starter cultures for Chinese fermented dry sausage[J]. *Meat Science*, 2016, 121: 302–309.
- [60] 储炫, 郭丽琼, 叶志伟, 等. 海带源降亚硝酸盐和胆固醇益生乳酸菌的筛选与鉴定[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(3): 163–167.
- [61] 张庆芳, 迟乃玉, 郑燕, 等. 乳酸菌降解亚硝酸盐机理的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2002(8): 27–31.
- [62] 郭丽琼, 郭心悦, 储炫, 等. 海带益生菌发酵条件的优化和营养成分分析[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(8): 280–285.
- [63] Zhai Q X, Tian F W, Wang G, et al. The cadmium binding characteristics of a lactic acid bacterium in aqueous solutions and its application for removal of cadmium from fruit and vegetable juices[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(8): 5990–5998.
- [64] 马欢欢, 白凤翎, 励建荣. 乳酸菌吸附作用清除食品中有毒重金属研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 301–307.
- [65] 于配配, 方孝贤, 何鑫平, 等. 海藻植物发酵液饮料的研制[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(21): 224–228.
- [66] Marsh, Alan J, Colin H, et al. Fermented beverages with health-promoting potential: Past and future perspectives[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2014, 38(2): 113–124.
- [67] Estevam, Adriana C T, Tiago A O. et al. Effect of aqueous extract of the seaweed *Gracilaria domingensis* on the physicochemical, microbiological, and textural features of fermented milks[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(4): 874–880.
- [68] Sarah Brochu. Development and shelf life evaluation of a novel fermented seaweed sauerkraut utilizing commercially important maine seaweeds[D]. Maine: The University of Maine, 2018.
- [69] 成群, 王洪斌, 邱春江, 等. 条斑紫菜乳酸发酵过程中理化因子的演替规律[J]. *食品科技*, 2018, 43(4): 81–86.
- [70] 郑宝林, 杨爽, 李晴, 等. 富含海藻提取物及益生菌冰淇淋的研制[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2015, 35(2): 22–25.
- [71] 付荣霞, 杨树成, 赵婧博. 发酵型海带、黑芝麻酸奶冻的研究[J]. *中国乳品工业*, 2010, 38(4): 26–28.
- [72] 颜玉虾. 海带乳酸菌咀嚼片的研制[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.